

LA MATERIA EN CONDICIONES EXTREMAS DE DENSIDAD Y TEMPERATURA

José Ruben Morones Ibarra

UANL-FCFM

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

Resumen:

El estudio de las propiedades de la materia cuando se encuentra sometida a condiciones extremas de temperatura y presión ha llamado la atención de los físicos nucleares y de partículas elementales debido a la importancia que este tema tiene para conocer las condiciones iniciales del universo. En los primeros instantes del Gran Estallido (Big Bang) el universo era una región muy pequeña del espacio y por lo tanto su densidad y temperatura eran enormes. Para entender que ocurrió después se requiere conocer las propiedades de las partículas subnucleares en estas condiciones. La evolución del universo depende de estas propiedades.

Introducción

Uno de los campos de investigación en Física que ha atraído el interés de amplios grupos de investigadores es el del estudio de la materia en condiciones extremas de densidad y temperatura. El interés de los científicos por este tema se debe a que en los primeros instantes del universo, pocas millonésimas de segundo después del Big Bang, la materia se encontraba en condiciones de elevada temperatura y densidad en un estado especial conocido como Plasma de Quarks y Gluones (PQG). Si queremos entender lo que ocurrió con el universo después de esto, es necesario conocer el comportamiento de la materia en estas condiciones.

Para estudiar a la materia en estas condiciones extremas se requieren grandes cantidades de energía incluso cuando se estudian cantidades de materia del orden de microgramos. En lugar de someter a estas condiciones extremas a cantidades **macroscópicas** de materia, los científicos han buscado hacerlo con núcleos atómicos pesados, provocando colisiones entre ellos a una gran energía.

En el diseño de experimentos para lograr estados de alta densidad y temperatura, los científicos se han visto en la necesidad de desarrollar grandes máquinas para acelerar partículas, como iones pesados, específicamente núcleos de oro y de plomo. Con estas máquinas se ha logrado acelerar a estos iones hasta alcanzar velocidades cercanas a la de la luz. Con esto, ha surgido el interés por provocar colisiones entre estos iones viajando a velocidades relativistas y observar cómo se comporta la materia durante estas colisiones. Cuando dos partículas chocan a grandes velocidades, sus constituyentes entran en una gran agitación térmica, lo que significa un estado de elevada temperatura. También, debido a la colisión, las partículas se comprimen sometiendo a la materia a una elevada densidad.

Estructura de la materia

La materia, como la observamos aquí en la Tierra, está formada por moléculas, las cuales son combinaciones de átomos, siendo estos las estructuras mínimas de los elementos químicos. Los átomos, a su vez, están formados por un núcleo de carga positiva y uno o más electrones, siendo el átomo eléctricamente neutro. En un sólido las moléculas o los átomos están fuertemente unidos. Si aumentamos la temperatura del sólido, los enlaces que unen a las moléculas en el sólido se debilitan y el sólido puede pasar al estado líquido. En este estado las moléculas siguen siendo los ladrillos básicos de la sustancia original, ahora en estado líquido, pero en este estado las moléculas tienen mayor movilidad.

Aumentando aún más la temperatura pasamos al estado gaseoso molecular, para después, al seguir aumentando la temperatura, llegar al estado gaseoso atómico.

Los elementos químicos naturales conocidos aquí en nuestro planeta son noventa y dos. Entre ellos están el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno, los cuales se encuentran en estado gaseoso a temperatura ambiente y son los principales componentes del aire, el cual resulta ser una mezcla de estos gases y otros más.

Clasificación de las partículas

La estructura teórica con la que se estudia el comportamiento de las partículas elementales se conoce como teoría cuántica relativista de campos y el modelo actual que las describe se conoce como Modelo Estándar.

De acuerdo con el Modelo Estándar, las partículas que se consideran fundamentales, esto es, que no están formadas por nada más pequeño que ellas y que son los ladrillos básicos con lo que se construye toda la materia, se clasifican de acuerdo con las fuerzas a las que reaccionan.

Para establecer la clasificación de las partículas es necesario introducir unos comentarios sobre las fuerzas fundamentales de la naturaleza. En la naturaleza se observan cuatro tipos diferentes de fuerzas o interacciones fundamentales: Las interacciones gravitacional, electromagnética, fuerte y débil. Todas las fuerzas o interacciones entre las partículas o entre los cuerpos macroscópicos pueden explicarse en términos de estas cuatro interacciones fundamentales.

Las partículas fundamentales de la naturaleza se clasifican de acuerdo con sus interacciones. Lo que en la actualidad se conoce como partículas fundamentales son los Leptones y los Quarks. Los leptones son partículas que no sienten la fuerza fuerte mientras que los quarks sí son sensibles a la fuerza fuerte. Hay seis leptones y seis quarks, divididos en generaciones. Es común en la Física de partículas usar letras griegas para designar a las partículas. Los símbolos usados para los leptones son: $e, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$, cuyos nombres son: electrón, neutrino del electrón, muón, neutrino del muón, tauón y neutrino del tauón, respectivamente. Para los quarks se usan los símbolos, u, d, s, c, t, y b, llamados: arriba, abajo, extraño, encanto, superior e inferior; respectivamente. Estos nombres corresponden a la traducción de los nombres en inglés: *up, down, strange, charm, top y bottom*.

La forma usual de representar estas partículas es en forma de bloques llamadas generaciones, las cuales se escriben como sigue:

LEPTONES: $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$

QUARKS : $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$

Los nombres correspondientes de estas partículas son: u: *up*: arriba, d: *down*: abajo, c: *charm*: encanto, s: *strange*: extraño, t: *top*: superior, y b: *bottom*: inferior. Esta forma de distinguir los quarks se conoce como clasificación por el sabor, ya que el atributo general u, d, c, etc., se conoce como **sabor del quark**; lo cual, por supuesto, no tiene ninguna relación con lo que en nuestra vida conocemos como sabor. Otro atributo de cada quark es lo que se conoce como **color del quark**, es una propiedad que se presenta en tres variedades, **rojo, verde y azul**, y que tampoco tiene relación con lo que conocemos en la vida diaria como color.

Tanto el sabor como el color son atributos que es les asignan a los quarks. Decir que hay seis sabores de quarks, es una forma de decir que hay seis tipos de quarks, y decir que cada uno de ellos se presenta en tres colores es equivalente a establecer que hay tres variedades de cada uno de ellos. Situaciones parecidas a estas se presentan regularmente en la ciencia. Como ejemplo mencionamos que cuando se descubrió la radiactividad se encontró que se presentaban tres tipos de desintegraciones radiactivas, a falta de un mejor nombre para ellas se les designó con las primeras tres letras griegas: α , β y γ . Estos nombres se quedaron así en la Física Moderna.

Altas temperaturas

Como ya se mencionó, las sustancias que conocemos están formadas, en general, por moléculas, las cuales son agrupaciones de átomos. Los átomos, a su vez, están formados por un núcleo de carga positiva y uno o más electrones, siendo el átomo eléctricamente neutro. En un sólido las moléculas o los átomos están fuertemente unidos. Si aumentamos la temperatura del sólido, los enlaces que unen a las moléculas en el sólido se debilitan y el sólido puede pasar al estado líquido. En este estado las moléculas siguen siendo los ladrillos básicos de la sustancia original, ahora en estado líquido, pero en

este estado las moléculas tienen mayor movilidad. Aumentando aún más la temperatura, pasamos al estado gaseoso molecular.

Si la temperatura de un cuerpo sólido se incrementa, este se convierte en líquido; y si seguimos aumentando la temperatura se transforma en gas. Al elevar la temperatura del gas, la agitación térmica se incrementa haciendo que los choques entre las partículas se hagan más violentos, intercambiando mayores cantidades de energía.

En un gas formado por moléculas, la elevación de temperatura provocará que las moléculas se disocien formándose un gas atómico. Si la temperatura de este gas se sigue incrementando, continúa la disociación en componentes más simples. Empiezan por desprenderse algunos electrones, formándose un gas de iones y electrones, el cual se conoce como **plasma**. El plasma ha sido llamado **el cuarto estado de la materia** y es por definición un gas ionizado con carga neta total igual a cero.

A temperaturas superiores a los diez mil grados Kelvin, todas las sustancias son gaseosas y existen solo en forma atómica ya que las moléculas se han disociado. A temperaturas aún más elevadas, los átomos se disocian en sus constituyentes: núcleos y electrones. Este estado, conocido como plasma, consiste en núcleos, electrones libres y los fotones que aparecen en la interacción y que corresponden al campo electromagnético causante de las interacciones.

Un plasma puede producirse también aplicando un intenso campo eléctrico a un gas. Este campo eléctrico puede producir el desprendimiento de electrones de los átomos (ionización). Tanto los electrones como los iones se aceleran en el campo eléctrico, produciendo choque con los otros electrones y aumentando así la ionización del gas. Este fenómeno termina siendo una descarga eléctrica que no es otra cosa que un gas ionizado o plasma. El fenómeno más familiar de descarga eléctrica es el rayo. El plasma lo encontramos también en el interior de los tubos de las lámparas fluorescentes. En un gas de hidrógeno donde existan isótopos de deuterio, se puede llegar a producir la fusión de los núcleos de deuterio si la temperatura y la presión son suficientemente elevadas. Este fenómeno ocurre en la explosión de una bomba de hidrógeno y en las estrellas.

Altas temperaturas y presiones

Cuando dos núcleos chocan a gran velocidad, la materia nuclear que los forma sufre un aumento considerable en su temperatura y densidad. La temperatura de

los núcleos puede alcanzar valores de millones de grados centígrados. En estas condiciones se espera que los nucleones (protones y neutrones) se disuelvan en sus constituyentes: los quarks y los gluones. A niveles subnucleares todos, los campos como el campo electromagnético o el campo de los gluones, se comportan como partículas. Por eso decimos que los constituyentes de los nucleones son quarks y gluones. Así como hablamos de un cambio de estado o transición de fase cuando el agua líquida pasa al estado gaseoso, así se habla de una transición de fase cuando los nucleones pasan de su estado de nucleones individuales a una sopa de quarks y gluones. A este estado de quarks y gluones se le conoce como plasma de quarks y gluones (PQG) y se le llama el séptimo estado de la materia.

Las predicciones teóricas establecen la existencia del PQG, el cual aparece a elevadas temperaturas y altas presiones, provocando que los neutrones y protones se desintegren en sus constituyentes fundamentales. Estas conclusiones se obtienen mediante cálculos y métodos de simulación por computadora basados en la teoría que describe el comportamiento de los quarks y gluones. El nombre de esta teoría es Cromodinámica Cuántica. El reto es intentar realizar los experimentos y si se logran reproducir las condiciones necesarias, saber si este estado de la materia puede ser producido en el laboratorio. Se supone que en los primeros microsegundos del universo la materia estaba en el estado de plasma de quarks y gluones. Lograr en el laboratorio obtener el PQG es como reproducir las condiciones en las que se encontraba el universo unos instantes después del Big Bang. Este es uno de los aspectos interesantes del estudio de este sistema de PQG.

Propagación de partículas en el medio nuclear

Así como se ha estudiado el sonido como una perturbación en un medio elástico, los fonones como resultado de la propagación de una perturbación o desplazamiento respecto de su posición de equilibrio de los átomos en una red cristalina y también la propagación de ondas electromagnéticas en medios materiales, podemos estudiar perturbaciones en el medio nuclear.

Los fonones, por analogía con los fotones, se consideran como partículas. De esta manera, la propagación de una perturbación en la función que representa la fuente de mesones en el medio nuclear genera una perturbación que se asocia con un mesón y que se propaga con ciertas características dinámicas.

Notación

En la Matemática, la notación juega un papel muy

importante. Lograr una notación compacta permite escribir expresiones matemáticas con apariencia más sencilla y nos ayuda a visualizar con mayor facilidad las relaciones entre las cantidades o variables que entran en las ecuaciones.

En la física teórica las formas compactas de expresión matemática resultan esenciales para detectar relaciones y analogías físicas que de otra manera resultaría imposible encontrarlas, puesto que estarían perdidas en una selva de símbolos que ocultan estas relaciones. En las teorías cuánticas relativistas es costumbre utilizar la notación de Einstein sobre la suma. La convención de Einstein consiste en que si en un término un índice aparece repetido esto implica una suma sobre estos índices. En las teorías relativistas se acostumbra a escribir los índices que se refieren al espacio-tiempo con letras griegas.

La notación más simple para las coordenadas del espacio-tiempo está dada por (x, y, z, ct) . Puesto que en el espacio de la relatividad especial, el cual es un espacio de cuatro dimensiones, conocido como espacio de Minkowski, la distancia de un punto del espacio tiempo al origen $(0,0,0,0)$ se escribe como $S^2 = x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$, entonces es conveniente definir un punto del espacio-tiempo como (x, y, z, ict) . Con esto la distancia de este punto al origen se puede escribir como $S^2 = x_\mu x_\mu$ donde se ha usado la convención de Einstein, con $x = x_1, y = x_2, z = x_3, ict = x_4$.

De igual manera definimos $\partial_\mu = \frac{\partial}{\partial x_\mu}$. Usando esta definición obtenemos que:

$$\partial_\mu \partial_\mu = \partial_x^2 + \partial_y^2 + \partial_z^2 - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \quad (1)$$

$$\partial_\mu \partial_\mu = \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \quad (2)$$

Con esta notación, la ecuación de onda para un campo $\phi(x, y, z, ict)$ toma la forma:

$$\partial_\mu \partial_\mu \phi(x, y, z, ict) = 0 \quad (3)$$

Definiendo $x = (x, y, z, ict)$

La ecuación de onda se escribe como:

$$\partial_\mu \partial_\mu \phi(x) = 0 \quad (4)$$

La ecuación de onda con una fuente $J(x)$ adquiere la forma:

$$\partial_\mu \partial_\mu \varphi(x) = J(x) \quad (5)$$

Cuando un campo tiene varias componentes φ^i con $i = 1, 2, \dots, n$

La ecuación de onda se escribe como:

$$\partial_\mu \partial_\mu \varphi^i(x) = J^i(x) \quad (6)$$

En las ecuaciones relativistas los campos vectoriales tienen índices espacio-temporales, lo que significa que tienen valores de 1 a 4.

La forma de la ecuación de onda es entonces:

$$\partial_\mu \partial_\mu \varphi^\nu(x) = J^\nu(x) \quad (7)$$

Con $\nu = 1, 2, 3, 4$

La ecuación de un campo vectorial relativista con masa, como la que presentan algunas partículas sub-nucleares está dada por:

$$(\partial_\mu \partial_\mu - m^2) \varphi^\nu(x) = -J^\nu(x) \quad (8)$$

Donde m es la masa del campo vectorial. La ecuación anterior se conoce como ecuación de Proca y es muy común encontrarla en la teoría relativista de campos cuánticos. [4]

Esta es la forma que adquiere una de las ecuaciones de movimiento que aparecen en el estudio de la materia nuclear. En este caso $J^\nu(x)$ resulta ser la densidad de la materia nuclear y es a su vez la fuente del campo vectorial, al cual llamaremos campo mesónico. [5]

En el cálculo variacional una variación de una funcional $\varphi(x)$ en un punto fijo x del espacio se define como $\delta\varphi(x) = \varphi'(x) - \varphi(x)$

Con esto estamos en condiciones de establecer la ecuación que deben satisfacer la propagación de las perturbaciones en la materia nuclear.

Consideremos una variación en la densidad nuclear

$\delta J^\nu(x)$ en la Ec. (8). Tomando la variación en ambos miembros de la ecuación, obtenemos:

$$(\partial_\mu \partial_\mu - m^2) \delta\varphi^\nu(x) = -\delta J^\nu(x) \quad (9)$$

Tomemos la transformada de Fourier en ambos miembros de la ecuación (9) para pasar al espacio de momentos y convertirla en una ecuación algebraica. Con esto obtenemos:

$$(k^2 + m^2) \delta\varphi^\nu(k) = \delta J^\nu(k) \quad (10)$$

El propagador libre de mesón $D_0(k)$ asociado a los modos colectivos arriba mencionados está definido como:

$$D_0(k) = \frac{1}{k^2 + m^2}$$

Por lo tanto la Ec. (10) se puede escribir como:

$$\delta\varphi^\nu(k) = -D_0(k) \delta J^\nu(k) \quad (11)$$

A su vez, las excitaciones colectivas $\delta\varphi^\nu(k)$ pueden inducir variaciones en la densidad nuclear $\delta J^\nu(k)$. Se supone que la respuesta del medio es lineal y escribimos la relación lineal más general entre ambas variaciones:

$$\delta J^\nu(k) = -\Pi^{\nu\mu} \delta\varphi^\mu(k) \quad (12)$$

La expresión para la función $\Pi^{\nu\mu}$ es muy complicada, aún en los ejemplos más sencillos. La idea aquí es mostrar solamente la línea de razonamiento que se sigue en la física nuclear y hacer notar que se le parece mucho a lo que se hace en el estudio de, por ejemplo, las propiedades microscópicas de los dieléctricos.

Sustituyendo la Ec. (12) en (11) obtenemos:

$$(\delta^{\nu\mu} - D_0(k) \Pi^{\nu\mu}) \delta\varphi^\mu(k) = 0 \quad (13)$$

$$\text{donde } \delta^{\nu\mu} = \begin{cases} 1 & \text{si } \nu=\mu \\ 0 & \text{para los demás casos} \end{cases}$$

La ecuación (13) es la que gobierna los modos colectivos de propagación en el medio. Sus soluciones, dadas por los valores de $\delta\varphi^{\nu}(k)$ están asociadas a los mesones vectoriales, conocidos con el nombre de mesón omega. De las propiedades de estas soluciones podemos determinar las propiedades de los mesones en la materia nuclear.

Para que la ecuación (13) tenga soluciones diferentes de la trivial, (de hecho un infinito número de ellas) se impone la condición de que el determinante de coeficientes sea cero. Esta condición se expresa como:

$$\text{Det}(\delta^{\nu\mu} - D_0(k)I\Gamma^{\mu}) = 0 \quad (14)$$

La solución de esta ecuación conduce a que la masa de los hadrones en el medio nuclear disminuye respecto a su valor en el vacío. Este resultado nos lleva a que el ambiente nuclear afecta las propiedades de los hadrones. Con esto podemos determinar cuál será el indicio de que en un choque entre iones pesados a velocidades relativistas se produzca el PQG. De estos estudios,

ahora se sabe que el estado de PQG se manifestará por una copiosa producción de pares kaón-antikaón. Los experimentos están ya diseñados para saber si podremos reproducir en el laboratorio las condiciones iniciales del universo.

Conclusiones

Varios son los resultados que podemos obtener del conocimiento de las propiedades de los hadrones en el medio nuclear. Una de ellas es que nos permite determinar cuáles son las condiciones bajo las cuales se puede obtener el plasma de quarks y gluones, el cual se supone que fue el estado primigenio del universo. Con esto podemos establecer suposiciones sobre el origen y la evolución del universo.

Similarmente el conocimiento de las propiedades de los hadrones en el medio nuclear nos permite obtener una ecuación de estado para la materia nuclear y así poder entender la evolución estelar. Debido a lo anterior, podemos establecer bajo qué condiciones una supernova puede evolucionar hacia una estrella de neutrones o un agujero negro.

Referencias

- [1] Shanshan C., Qin, G.Y., Bass, S.A. and Muller, B. "Collisional vs. Radiative Energy Loss of Heavy Quark in a Hot and Dense Nuclear Matter". *Nuclear Physics*. A904-905. Pp.653c-656c. 2013.
- [2] J. W. Harris and B. Muller. "The search for Quark-Gluon-Plasma". ARNPS. 1996.
- [3] Greiner, W., Stocker, H. and Gallmann, A. "Hot and Dense Nuclear Matter", NATO ASI Series, Vol. 335. 1994.
- [4] Waleka, J. D. *Theoretical Nuclear and Subnuclear Physics*, Second edition. World Scientific. 2004.
- [5] Jackson, J. D. *Classical Electrodynamics*. Third Edition. John Wiley and Sons. 1998.
- [6] Morones-Ibarra, J. R., Menchaca Maciel, M., Santos-Guevara, A. and Robledo Padilla, F. *Pramana Journal of Physics*. Vol. 80 Pp. 479-485. 2013.

Datos del Autor:

Rubén Morones Ibarra

Es Licenciado en Ciencias Físico Matemáticas por La UANL y Doctor en Filosofía con especialidad en Física Nuclear, por la University of South Carolina, Department of Physics and Astronomy, (EUA). Cuenta con diversas publicaciones y más de 100 citas.

Dirección del autor: Ciudad Universitaria, S/N, C.P. 66451, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

Email: rubenmorones@yahoo.com.mx